

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160108

咸水结冰灌溉改良盐碱地的研究进展及展望*

郭 凯 巨兆强 封晓辉 李晓光 刘小京**

(中国科学院农业水资源重点实验室/中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心 石家庄 050022)

摘 要 冬季咸水结冰灌溉技术是滨海区高矿化度咸水利用和盐碱地改良的有效手段,该项技术依据咸水结冰融化过程中咸淡水分离的基本原理,基于区域气候特点、土壤水盐运移规律以及作物生长发育规律,在冬季抽提当地高矿化度地下咸水对盐碱地进行灌溉,并在冬季低温作用下迅速冻结成咸水冰,春季咸水冰层融化过程中,咸淡水分离入渗,其中先融化的高矿化度咸水先入渗,而后融化出的低矿化度微咸水和淡水的入渗对土壤盐分具有较好的淋洗作用,以上过程实现了春季土壤返盐期的土壤脱盐,结合春季地表覆盖抑盐措施和夏季降雨淋盐,土壤的低盐条件得到保持,保证了作物和植物整个生长期的正常生长。该项技术改变了滨海盐碱区土壤水盐运移特征,使春季土壤积盐期变为脱盐期,咸水结冰灌溉后,春季耕层土壤盐分由最初的 $12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 迅速降低至 $4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以下,脱盐率达到 66% 以上,实现了棉花、油葵、甜菜等作物在滨海重盐碱地中的种植,提高了柽柳、枸杞、白蜡等盐生植物和耐盐植物的扦插移栽成活率,咸水结冰灌溉当年便获得了籽棉产量 $3 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、油葵 $1.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、甜菜 $60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,以及 90% 以上的盐生植物和耐盐植物的扦插成活率,促进了滨海盐碱地盐碱地的开发、农业发展和生态环境建设。近年来,通过系统的研究,我们探明了咸水结冰灌溉过程中咸水冻融咸淡水分离规律,明确了咸水结冰灌溉对土壤盐分的淋洗效果,构建了冬季咸水结冰灌溉改良盐碱地技术体系,确立了冬季咸水结冰灌溉的灌溉时间、灌溉水量和水质等指标体系。本文在以上研究基础上,对盐碱地咸水利用的研究进展进行了总结,并对咸水结冰灌溉基本原理、影响因素以及土壤盐分淋洗效果等方面进行了概述,系统分析了冬季咸水结冰灌溉在盐碱地区农业生产、植被恢复以及咸水利用等方面的作用,并就其未来发展趋势进行了展望。

关键词 盐碱地改良 咸水利用 咸水结冰灌溉 植被恢复 盐分淋洗

中图分类号: S156.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2016)08-1016-09

Advances and expectations of researches on saline soil reclamation by freezing saline water irrigation*

GUO Kai, JU Zhaoqiang, FENG Xiaohui, LI Xiaoguang, LIU Xiaojing**

(Key laboratory of Agricultural Water Resources, Chinese Academy of Sciences / Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050022, China)

Abstract The use of freezing saline water to irrigate saline lands has proven an effective method of using highly saline water and reclaiming saline lands in coastal regions. The method was based on the basic principle of desalination during melting of frozen saline water in combination with soil water and salt movement characteristics and crop growth pattern in coastal region. In winter, the saline groundwater was pumped and irrigated saline farmlands. The low air temperature forced the irrigated saline water on the top soil to freeze into saline ice. With increasing air temperature in spring, water of high salt concentration melted firstly and infiltrated into the soil, and the slightly saline melting water and freshwater infiltrated into the soil late and

* 中国科学院科技服务网络计划(KFJ-EW-STS-057)和国家科技支撑计划项目(2013BAD05B02, 2013BAD05B05)资助

** 通讯作者: 刘小京, 从事缺水盐渍区水土资源高效利用研究。E-mail: xjliu@sjziam.ac.cn

郭凯, 从事盐碱区水土资源高效利用研究。E-mail: gkking001@163.com

收稿日期: 2016-02-02 接受日期: 2016-02-29

* This study was supported by the Science and Technology Service Network Program of the Chinese Academy of Sciences (KFJ-EW-STS-057) and the National Key Technologies R & D Program of China (2013BAD05B02, 2013BAD05B05).

** Corresponding author, E-mail: xjliu@sjziam.ac.cn

Received Feb. 2, 2016; accepted Feb. 29, 2016

effectively facilitated leaching of soil salt. From the above process, freezing saline water irrigation induced soil salt leaching in spring, the period of soil salt accumulation. This, in combination with mulching in spring to control soil salt concentration and rainfall leaching in summer, lowered soil salt content to levels conducive for normal crop growth throughout the growth stages of the crops and plants. The natural characteristics of soil water and salt movement were modified by freezing saline water irrigation, which changed soil salt accumulation into soil salt leaching in spring after irrigation. Thus the remaining soil salinity in the root zone effectively decreased from $12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ to $4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ and the rate of salt leaching exceeded 66%. This facilitated the cultivation of crops including cotton, oil-sunflower and sugar beet in saline coastal regions of the Bohai Sea, and increased the survival rates of *Tamarix ramosissima*, *Lycium barbarum* and *Fraxinus chinensis* transplanted seedlings in the region. After first year freezing saline water irrigation, the yields of seed cotton, oil-sunflower and sugar beet were $3 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, $1.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, respectively. Cutting and transplanted seedling survival rates of halophytes and salt-tolerant plants exceeded 90%. Freezing saline water irrigation promoted saline soil exploiting, agricultural development and ecological environmental construction. Through systematic researches in recent years, the separation process of saline water and freshwater was clarified in the process of saline water freezing and thawing. The effects of freezing saline water irrigation on soil salt leaching were explicated, and the indexes system of irrigation time, irrigation amount and water quality of freezing saline water irrigation was established. Based on the above researches, this paper summarized the advances in researches on saline soil reclamation and saline water use, and introduced the freezing saline water irrigation strategy which enhanced leaching of soil salt. The paper further systematically analyzed the effect of freezing saline water irrigation on agricultural production, vegetation recovery and saline water utilization in saline soil regions, and the development trend of freezing saline water irrigation.

Keywords Saline soil reclamation; Saline water utilization; Freezing saline water irrigation; Vegetation restoration; Soil salt leaching

土壤盐碱化是限制干旱和半干旱区农业生产和生态环境改善的主要因素, 由于土体中较高的盐分含量, 且具有不良的物理和化学性质, 至使大多数植物的生长受到抑制, 甚至不能生长^[1-2]。据农业部第 2 次全国普查统计资料显示(1985 年), 我国盐碱土资源总量约为 3 467 万 hm^2 , 约占我国耕地面积的 6.62%, 而目前已开垦种植的盐碱土面积仅为 $577 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ^[3-5]。因此, 作为我国重要的后备耕地资源, 开发和利用盐碱地对于补偿日益减少的耕地面积、保障粮食安全具有重要的意义。

土壤盐分在土体中的运动具有“盐随水来、盐随水去”的特点, 且具有明显的季节性变化。在盐碱地改良中, 应根据盐碱地分布区的气候、地形和土壤等条件, 选择配套的改良措施^[6], 达到综合改良盐碱地, 促进土壤水盐动态的良性循环的目的。针对盐碱地的改良, 国内外开展了大量的研究, 目前, 盐碱地改良措施主要包括物理改良、化学改良和生物改良等^[7]。大多改良措施是以改善土壤结构, 增强土壤的通透性为主要方式, 究其根本还必须配合以“淡水压盐”为基础的水利工程措施, 淋洗和排出多余的土壤盐分, 才能达到改良盐碱地的目的, 这也是目前盐碱地改良中最有效的措施, 因此充足的淡水是盐碱地改良的重要保证^[6]。但在盐碱区淡水资源严重匮乏, 尤其是在春季作物需水的关键期和土壤返盐的高峰期, 淡水资源短缺的问题更为严重。

在以上背景下, 浅层地下咸水和劣质水的利用逐渐被人们所重视, 也成为盐碱区盐碱地改良、农业生产和生态环境建设的重要选择。据研究, 盐碱地分布区地下咸水资源丰富, 且利用潜力巨大, 如河北省沧州市可供水量为 4.7 亿 m^3 , 而利用率仅为 8%, 当利用率达到 20%, 微咸水供水量达到 0.94 亿 m^3 ^[8]。对于低矿化度的咸水($<5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$), 采用直接灌溉、咸淡水混灌、微灌和土壤培肥等措施可实现保证作物正常生长和土体盐分周年平衡, 且不会造成次生盐渍化的问题^[9-10]。而对于高矿化度咸水, 由于盐分含量较高则不能直接用于灌溉, 因此如何合理利用这些高矿化度的地下咸水用于盐碱地的改良是该地区农业生产中亟需解决的问题。

基于以上背景, 我们依据区域气候条件、土壤水盐运移规律和植物生长发育规律, 基于咸水结冰冻融咸淡水分离原理, 提出了冬季咸水结冰灌溉改良盐碱地技术, 该项技术充分利用区域冬季低温条件和丰富的咸水资源, 在冬季, 对盐碱地进行结冰灌溉, 咸水冰融化过程中, 后融化出的微咸水和淡水对土壤盐分具有较好的淋洗效果, 结合后续的抑盐措施和夏季降雨淋盐, 为作物出苗和植物生长创造土壤低盐条件^[11-13]。该项技术突破了传统“淡水压盐”改良盐碱地的束缚, 实现了春季土壤脱盐, 且节约了淡水, 为盐碱区咸水利用和盐碱地改良提供了新的方法, 在我国北部盐碱地分布区具有广泛的应

用前景。

本文分析了盐碱土的水盐动态规律和改良措施,系统地总结了咸水利用、咸水冻融淡化以及咸水结冰灌溉和相关配套技术等方面的研究进展,结合目前国内外研究热点问题,对咸水结冰灌溉技术进行了展望,以期为盐碱地改良和咸水综合利用提供技术支撑。

1 盐碱土冻结过程中的土壤水盐动态规律

土壤盐分在土体中的运动具明显的季节性、强烈的表聚性、类型的复杂性以及积盐和脱盐的反复性等特点^[3]。土壤的水盐运移主要受到降雨和蒸发等的影响。以河北省环渤海低平原区为例(图1),土壤盐分的动态特性表现为春、秋、冬季土壤积盐、夏季土壤脱盐。冬季至春季土壤会出现冻结和融化,也伴随着土壤的水盐运动,其中土壤冻结是土壤潜在积盐的过程,而春季土壤冻层的融化和土壤水分蒸发是其“爆发式”积盐的主要原因^[14]。张殿发等^[15]研究表明在土壤冻结过程中,冻层形成的土壤剖面可分为3层,随着土壤层次的加深依次为冻结层、似冻层和非冻层。土壤的冻结伴随着土壤水分由液相向固相转变,导致冻层的水势降低,也驱使深层土中的水分和盐分逐渐向冻层迁移,致使冻结层中水分和盐分含量逐渐升高。似冻层在冻结层以下并随冻结层的增厚不断下移,该层水分和盐分不断向冻层集结。春季的土壤融化和水分蒸发造成了表层土壤强烈返盐。土壤冻层的融化分别在冻层上下两个锋面进行,冻层下锋面融化后的水分和盐分直接向深层迁移,而上锋面的融化则快于下锋面,且融化的水分和盐分在未融化冻层的阻隔作用下滞留于冻结层之上,且随着土壤水分蒸发迅速向表层土壤聚集直到冻层全部融通,这也是导致了春季的土壤“爆发式”积盐的直接原因^[16]。此后,土壤盐分淋洗

又随着夏季、秋季的降雨和蒸发的影响,而呈现出淋洗和再次返盐的现象。

不同类型的盐碱土具有不同的物理和化学性质,这也造成了盐碱土改良的复杂性,应根据盐碱土具体特性,采用因地制宜的方法综合改良和利用盐碱地。目前,采用以“淡水压盐”为主的水利工程措施是盐碱地改良中最为有效的措施,但在盐碱分布区淡水资源短缺,限制了这一措施的实施,而如何合理利用该地区丰富的地下咸水改良盐碱地成为该地区农业生产中亟待解决的问题。

2 咸水利用现状

在淡水资源缺乏的背景下,盐碱区丰富的地下咸水成为农业可利用的潜在水资源,研究表明咸水灌溉可在一定程度上缓解由于淡水不足造成的干旱问题,甚至可在不影响土壤性质的情况下,实现作物的增产。但是如果利用不当则会造成土壤退化和作物减产。因此,如何合理利用这些地下咸水已经成为农业灌溉中重要的研究方向^[8,17],国内外针对咸水灌溉条件下土壤水盐运移规律开展了大量的研究工作^[7,18-19],其中,咸水灌溉时的水量、水质和土壤状况对土壤水盐运移均有重要影响。据研究,咸水灌溉水量对土壤盐分淋洗具有重要影响,一定量的咸水可对土壤盐分进行有效的淋洗,并随着入渗水量的增加,土壤的脱盐深度逐渐加深^[20-21],逢焕成等^[10]指出利用咸水进行灌溉时,一次性灌溉量不宜过低,否则会使一部分盐分滞留在表层土壤。同时,咸水的矿化度也是影响土壤盐分淋洗的重要因素,灌溉水的矿化度过高,会造成土壤盐分累积问题,肖振华等^[22]研究表明在利用咸水进行灌溉时,灌溉水带入土壤的盐分在土壤中累积与淋洗交替进行,当灌溉水矿化度小于 $3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,土壤剖面中的盐分处于平衡状态,超过 $3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$,则有不同程度的积盐。除咸水矿化度外,咸水的钠吸附比(SAR)是灌溉水质的另一个重要指标,该项指标是咸水中 Na^+ 和 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的相对比值,其计算公式为 $\text{SAR} = \text{Na}^+ / \sqrt{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}}$,公式中离子的单位为 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[23-24]。咸水的 SAR 也对土壤盐分淋洗具有重要影响。Suarez 等^[25]指出咸水入渗对土壤具有双重作用,一方面灌溉水的盐分有助于稳定土壤孔隙结构,提高土壤的导水通气性,随着咸水矿化度的增加,咸水的入渗加快;而另一方面,如果灌溉水中的 Na^+ 比例过高,则会导致土壤中的颗粒分散,土壤导水通气能力下降。同时,盐碱土的类型也影响着咸水的

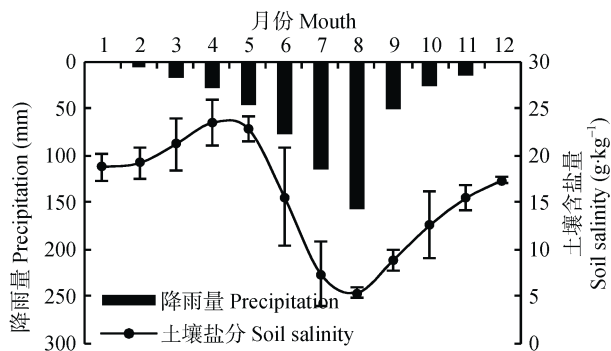


图1 环渤海盐碱区土壤含盐量和降雨的周年动态
Fig. 1 Annual changes of soil salinity and precipitation in the coastal area around Bohai Sea

入渗和盐分的淋洗,与盐土相比,咸水的入渗对碱土的影响较大。此外,土壤的水盐动态也受咸水灌溉方式和灌溉制度影响。王卫光等^[9]指出咸水灌溉的关键是选择适当的灌溉方式。目前,咸水的灌溉方式主要有漫灌、沟灌、喷灌和滴灌。其中滴灌方式比其他灌溉方式能更好地调整根区土壤盐分状况和获得更高的作物产量。同时,咸水灌溉可依据当地的水资源条件,结合其他水质进行咸淡混灌和轮灌以达到更好的土壤盐分淋洗的效果^[9,24]。

3 咸水结冰灌溉改良盐碱地的研究进展

3.1 咸水淡化和咸水结冰灌溉改良盐碱地技术原理

目前,在咸水灌溉中,相关研究主要针对矿化度小于 $5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的微咸水的利用,而对于高含盐量的咸水则被认为是不能直接用于灌溉,否则会造成土壤积盐和退化^[19,22,26]。而根据调查盐碱区地下咸水矿化度普遍较高,以环渤海盐碱区为例,该地区浅层地下水的矿化度均大于 $7\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[8]。在此背景下,有研究提出咸水淡化技术可解决高矿化度咸水难以直接用于灌溉和改良盐碱地的问题^[27]。目前,对于咸水淡化多采用咸水冻融、蒸馏、电渗析及反渗透等方法,且咸水淡化的研究也主要集中在咸水淡化的工艺和设施^[28-30]。其中蒸馏法、电渗法和反渗透法的应用基础设施复杂,成本昂贵,主要用于解决饮

用水和工业用水,但用于灌溉和盐碱地改良显然不现实^[31]。因此,咸水自然冻融法成为解决该地区高矿化度咸水难以利用问题的重要选择。咸水冻融淡化技术是利用咸水冻结和融化两个过程实现咸淡水分离的目的(图2)。咸水结冰和融化过程中均是脱盐过程,且融化过程的脱盐效果显著好于结冰过程^[32]。据研究,咸水的冻结过程非常复杂,经过冻结后的咸水冰是冰晶、卤水胞、气泡和其他固体的混合物,其中盐分主要以盐胞的形式存在,当咸水冰融化时盐胞会相互连通而形成盐分淋洗的通道,通过这个过程咸水冰实现脱盐^[33-34]。近年来,有研究通过采集海冰进行淡化处理后用于农业灌溉,且取得了较好效果^[34],但海冰的收集、运输、储存等也限制了此项技术的推广和应用,且海水冰也为农田系统带入了外来盐分。

考虑到以上问题,依据当地气候特点和土壤水盐动态规律,我们提出了冬季咸水结冰灌溉的构想,即充分利用北方盐碱区冬季的低温条件,在冬季直接抽提当地地下咸水对盐碱土进行灌溉,灌溉后咸水在低温作用下迅速冻结成冰,春季咸水冰逐渐融化入渗,其中后融化的微咸水和淡水对土壤盐分具有较好的淋洗作用,结合后续的降雨和抑盐措施,可实现植物整个生育期土壤脱盐,保证植物的正常生长^[11-12]。

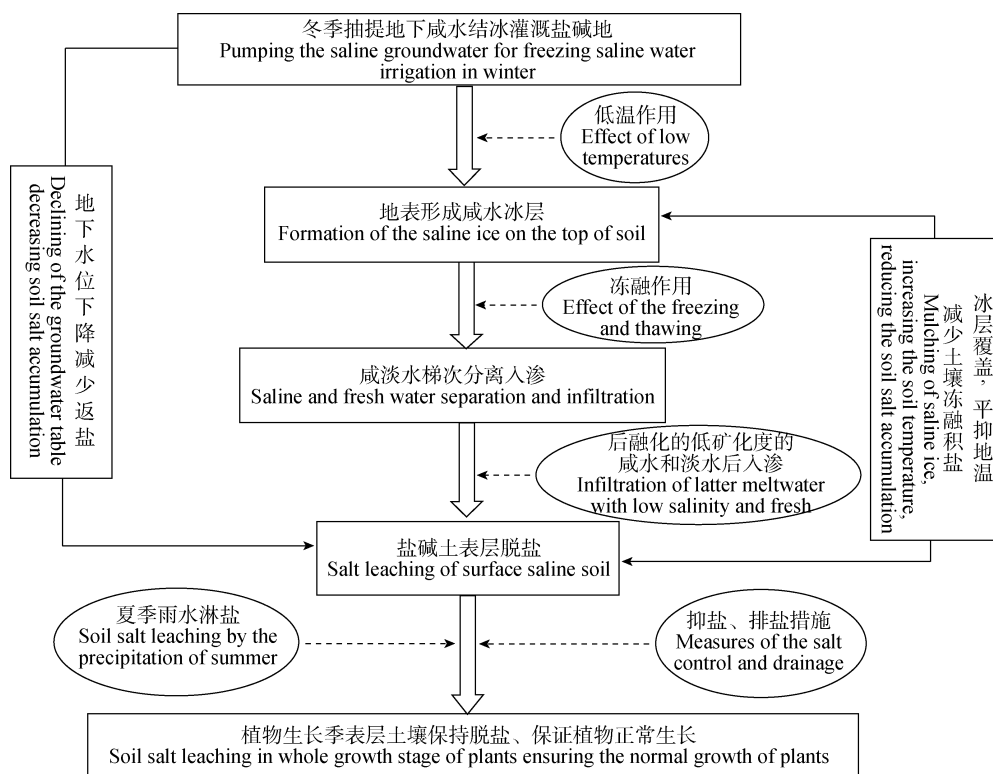


图 2 冬季咸水结冰灌溉改良盐碱地技术路线图

Fig. 2 Design diagram of reclaiming saline soil by freezing saline water irrigation in winter

3.2 咸水结冰灌溉改良盐碱地效果和影响因素

3.2.1 改良效果

咸水结冰灌溉技术自实施以来取得了显著的盐碱地改良效果^[11-12],这得益于咸水冻融过程中显著的淡化效果,在此过程中所产生的微咸水和淡水对土壤盐分创造了良好的淋洗条件。研究表明:利用 $15\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的咸水冰在室温田间下进行融化,可产生50%以上矿化度小于 $3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的微咸水和淡水,且随着咸水冰的融化,其钠吸附比(SAR)也逐渐降低^[34]。田间利用 $13.5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的咸水进行冬季结冰灌溉后,咸水在低温作用冻结成冰,咸水冰在春季融化过程中,可产生75%以上矿化度低于 $3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的微咸水和淡水,这些水的入渗对土壤盐分具有较好的淋洗作用;咸水结冰灌溉后,在地表形成了咸水冰层,冰层的覆盖平抑了地温,提高了土壤温度,减少了土壤的冻融积盐^[35],据研究,冬季利用水量为180 mm的咸水进行结冰灌溉,土壤温度约提高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$,可减少冻层8.5 cm,约减少19.8%的盐分在冻层的积累;咸水冰完全融化和入渗后,根层(0~40 cm)土壤含盐量迅速降低,由灌溉前高于 $10\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 迅速降至融水入渗后的 $3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下,脱盐率达到70%以上;此时,配合地表覆盖措施后,可使土壤盐分维持在这一土壤盐分水平以下,使植物和农作物安全度过春季土壤返盐高峰期,据研究,春季利用地膜覆盖和残茬旧膜对土壤盐分的抑制效果较好,可使土壤盐分保持在 $4\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以下^[36];至夏季,雨季来临,土壤呈淋盐状态,保证了作物和植物的正常生长,且当年便可获得理想的作物产量和植物生长量,在咸水结冰灌溉基础上,种植了棉花、油菜、甜菜、甜高粱、柽柳和枸杞等耐盐作物和盐生植物,作物的出苗率均达到80%以上,盐生植物扦插成活率达到90%以上,且作物产量和植物的生长量均较理想^[11-12];此外,随着咸水结冰灌溉年限的延长,土壤盐分和土壤的SAR均逐年降低,作物产量逐年提高^[35]。室内利用咸水结冰入渗滨海盐土过程中,咸水冰融水在盐碱土中的入渗速度和深度均快于和深于淡水冰,且盐分的淋洗效果好于淡水冰,这可能由于先融化的高矿化度咸水的入渗改善了土壤结构,为后融化的微咸水和淡水的入渗创造了条件^[11]。咸水冰融水入渗后,土壤表层盐分淋洗效果较好,当利用 $15\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的表层(0~20 cm)土壤盐分由 $21.2\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 降低至入渗后的 $2.5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,脱盐率达到95%以上^[37],且土壤中 Na^{+} 和 Cl^{-} 的迁移速度均快于其他处理^[38-39]。因此,咸水结冰灌溉解决了滨海盐碱区咸水矿化度高而难以利

用的难题,对重盐碱区农业生产和生态环境改善具有重要作用。

3.2.2 影响因素

咸水结冰灌溉对土壤盐分的淋洗效果受多种因素影响。不同矿化度和水量的咸水冰融水入渗滨海盐土的结果表明:在一定矿化度下,咸水水量越高,咸水冰融化所产生微咸水和淡水的水量也就越高,在土壤中的入渗速度和深度也就越快和越深,对土壤盐分淋洗效果越好,室内利用矿化度为 $10\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和水量分别为90 mm、135 mm和180 mm的咸水冰融水入渗滨海盐土后,表层土壤(0~20 cm)的脱盐率分别为29.7%、56.7%和96.2%;在一定水量下,利用矿化度越高的咸水冰融化入渗盐碱土时,其入渗速度越快,深度也就越深,且对土壤盐分的淋洗效果越好。利用180 mm矿化度分别为 $5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $10\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $15\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的咸水冰进行融水入渗后,表层土壤(0~20 cm)脱盐率分别为95.7%、96.2%和96.3%^[11];除咸水矿化度外,咸水SAR也是影响融水入渗和盐分淋洗的重要因素,利用SAR较高的咸水冰融水入渗盐碱土时,由于咸水中含有较高的 Na^{+} 比率,对土壤的渗透性和透水性产生不利的影响,导致其入渗速度和深度均较慢和浅,且脱盐效果较差,尽管如此,咸水冰的脱盐效果却始终要好于淡水冰,利用SAR分别为5、10、30的咸水冰融水入渗滨海盐土后,表层土壤(0~20 cm)的脱盐率分别为92.5%、89%和87%,均显著大于淡水处理的80%^[39-40]。此外,咸水冰融水对土壤盐分的淋洗效果还受土壤状况的影响,如土壤类型、土壤水盐条件以及土壤容重等。研究表明,咸水冰融水对苏打碱土的入渗效果好于滨海盐土,室内利用矿化度为 $10\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的咸水冰融水入渗以上两种土壤,相对于淡水冰,咸水冰融水在苏打碱土中和滨海盐土中的入渗速度分别快23.44倍和2.54倍^[40-42],但在苏打碱土的中盐分淋洗效果则差于滨海盐土,这与土壤中的离子组成有关。咸水冰融水入渗盐碱土过程中,土壤含水量显著影响了盐分的淋洗效果。据研究,水分在土壤中的入渗过程和土壤含水量有密切的关系,土壤含水量越高,入渗速度越慢,当咸水冰融水入渗高含水量的盐碱土时,由于水分入渗速度慢,盐分在土壤中的迁移也越慢,盐分淋洗效果不好。综合以上结果来看,咸水水质、水量和土壤状况等是影响咸水结冰灌溉对土壤盐分淋洗效果的重要因素,除此之外,其他因素如地下水埋深和水质、土壤物理化学性质以及土壤冻结等对咸水结冰灌溉过程中融水的入渗和盐分淋洗效果的影响尚

待进一步研究。

3.3 冬季咸水结冰灌溉改良盐碱地技术体系

在对咸水结冰灌溉相关研究的基础上, 我们构建了咸水结冰灌溉改良盐碱地技术体系, 并确立了咸水结冰灌溉时间、水质和水量以及其他相关配套措施。

表 1 不同咸水结冰灌溉时期对不同时期土壤含盐量的影响

Table 1 Effect of different dates of freezing saline water irrigation on soil salt content

$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$

灌溉日期(月-日) Irrigation time (month-day)	调查日期(月-日) Investigation time (month-day)				
	01-06	01-20	02-05	03-23	05-04
不灌溉 No irrigation	21.7	22.1	20.7	19.4	22.0
01-07	12.5	8.1	4.5	6.7	9.2
01-20	17.9	13.8	6.8	6.7	9.3
20-05	14.1	16.8	15.2	8.7	11.0

3.3.2 咸水结冰灌溉水量的确定

咸水结冰灌溉的水量可根据灌溉水质, 利用咸水结冰融水二元回归方程确定适宜的灌溉水量。根据盐碱土冲洗改良需水量和咸水结冰融水咸淡水分离的二元回归方程, 确定了盐碱地咸水结冰灌溉淋洗定额方程:

$$V = M/Y_s \quad (1)$$

式中: V 为咸水结冰灌溉定额($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$), M 为淡水冲洗定额($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$), Y_s 为咸水冰不同矿化度融水占总融水的百分比(%)。

淡水冲洗定额是基于简化的盐分运动理论, 假设盐分在土壤垂直运动, 冲洗水与盐溶液完全掺混的冲洗定额计算公式如下:

$$M = 100H\gamma(\theta_f S_0/S_a - \theta_0) + e - P \quad (2)$$

式中: M 为冲洗定额($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$), H 为计划脱盐深度(m), θ_f 为土壤的田间持水率(干土重的%), θ_0 为初始土壤含水率(干土重的%), S_0 、 S_a 为冲洗前土壤含盐量、冲洗后要求达到的含盐量(S_0 未包括灌溉水带入土壤中的盐分), γ 为土壤容重, e 为冲洗期间的蒸发量, P 为冲洗期间的降雨量。

下式为不同矿化度咸水结冰融水咸淡水分离的二元一次方程:

$$Y_{5\text{g} \cdot \text{L}^{-1}} = 74.052 - 0.945T_m - 1.018S_i \quad (R^2 = 0.877^{**}) \quad (3)$$

$$Y_{4\text{g} \cdot \text{L}^{-1}} = 71.867 - 0.536T_m - 0.942S_i \quad (R^2 = 0.803^{**}) \quad (4)$$

$$Y_{3\text{g} \cdot \text{L}^{-1}} = 66.823 - 0.962T_m - 0.842S_i \quad (R^2 = 0.788^{**}) \quad (5)$$

$$Y_{2\text{g} \cdot \text{L}^{-1}} = 66.757 - 1.087T_m - 0.879S_i \quad (R^2 = 0.813^{**}) \quad (6)$$

$$Y_{1\text{g} \cdot \text{L}^{-1}} = 60.365 - 1.148T_m - 0.731S_i \quad (R^2 = 0.759^{**}) \quad (7)$$

式中: Y 为融水百分比(%), T_m 为融冰温度($^{\circ}\text{C}$), S_i 为咸水冰初始含盐量($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)。

以上计算的灌溉水量与实际灌水量基本相符, 以环渤海滨海盐碱区为例, 利用 $12 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的咸水对

3.3.1 咸水结冰灌溉时间的确立

表 1 为不同咸水结冰灌溉时间下土壤含盐量的变化过程, 以 1 月中上旬日均温度低于 -5°C 时灌溉为宜, 灌溉后可以稳定结冰, 咸水结冰洗盐效果较好; 如果灌溉太晚, 结冰效果不好, 且由于土壤冻融积盐, 不利于盐碱地脱盐。

滨海重盐碱土进行结冰灌溉, 要达到使土壤含盐量由最初的 $12 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 降低至灌溉后的 4% 以下时, 计算所得的咸水结冰灌溉水量约为 196 mm ($1954.5 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$), 实际灌水量为 180 mm ($1800 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)。

3.3.3 相关配套技术措施

春季是土壤返盐的高峰期, 尽管经过咸水结冰灌溉的地块, 土壤盐分显著降低, 但在强烈土壤蒸发的影响下, 土壤仍会迅速返盐, 为解决以上问题, 我们研究了不同措施的抑盐效果。结果表明, 春季咸水冰融化入渗后采用地膜覆盖抑盐效果最好, 其次是秸秆覆盖, 至作物播种和盐生植物移栽期, 耕层土壤盐分可保持在 $4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以下, 这对作物出苗和盐生植物移栽成活创造了良好的土壤低盐条件。对于耐盐作物(棉花、油葵和甜高粱等), 播种前进行地膜清理、施肥、旋耕, 并及时播种覆膜, 以保持土壤水分和控制返盐, 施肥措施为底肥一次性施入, 肥料为缓释肥, 施肥量为 $750 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 此后的田间管理和一般情况下基本一致; 对于盐生植物(柽柳、枸杞等)的种植, 采用育苗扦插的方法, 包括剪枝、育苗、扦插移植等过程, 可直接将幼苗移植至覆盖有地膜的土壤中, 此时土壤盐分较低, 可保证幼苗成活, 此后在幼苗旺长期, 进行适当追肥。

3.4 冬季咸水结冰灌溉改良盐碱地技术的适用范围

冬季咸水结冰灌溉改良盐碱地技术是依据咸水冻融淡化梯度入渗盐碱土的基本原理, 利用冬季自然低温条件, 从高含盐量咸水中分离出微咸水和淡水来改良盐碱地的水利措施。主要在冬季气温稳定降低至 -5°C 时进行结冰灌溉, 此时灌溉后咸水才能稳定结冰, 且春季气温回升时咸水冰融解淡化效果较好, 因此该项技术适用于具有冬季自然低温条

件的广大北方盐碱地分布区。

4 冬季咸水结冰灌溉改良盐碱地技术的社会、经济效益

盐碱地改良和咸水安全利用始终是干旱、半干旱地区以及沿海地区农业发展和生态建设过程中迫切需要解决的问题。咸水结冰灌溉针对以上现实问题,充分利用了当地的气候条件和咸水资源,节约了淡水,为盐碱区盐碱地改良和咸水利用提供了技术支撑。通过相关研究,我们建立了以咸水结冰灌溉为主体技术的“两创一综合”技术体系,即创新淋排盐方式,变传统的淡水灌溉淋盐为咸水结冰融水淋盐;创新临界水位,即保证土壤耕层季节性脱盐;综合利用盐碱地改良的灌排等技术措施。

围绕盐碱区棉花、油葵、甜菜、甜高粱、菊芋等耐盐作物和柽柳、枸杞等盐生植物,我们开展和集成了多种以冬季咸水结冰灌溉改良盐碱地技术为基础的适生种植模式,采用以上模式后,土壤含盐量可控制在 0.4%以下,且逐年下降,棉花出苗率达 85%以上,油葵、甜菜、甜高粱和菊芋出苗成活率达 90%以上,柽柳和枸杞等盐生植物的移栽成活率达 90%以上。以上技术模式有力带动了盐碱区棉花、能源植物、牧草、植被建设和生态建设等产业的发展,使过去不能利用的滨海盐碱荒地得到高效利用。咸水结冰灌溉的投入产出比高达 1:3 以上,节约淡水资源 $1\ 800\ \text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 以上,大大节约了农业投入和绿化成本,促进了盐碱地区经济效益、生态效益和社会效益的共同发展。

5 结论与展望

目前,针对咸水结冰灌溉过程中相关问题开展了大量的研究工作,包括咸水结冰灌溉条件下的咸水冻融淡化效果、咸水冰融水入渗盐碱土过程、咸水冰融水入渗盐碱土后土壤盐分淋洗和影响因素、咸水结冰灌溉下土壤温度和冻融、多年咸水结冰灌溉下土壤盐分动态等。主要结论如下:咸水冻融过程中的淡化效果显著,淡化后的咸水冰对土壤盐分具有较好的淋洗效果;咸水结冰灌溉后,土壤盐分迅速降低,结合春季地表覆盖措施后,土壤的低盐条件进一步得到保持,保证了作物的出苗和生长;融水入渗过程中咸水冰的入渗深度和速度均深于和快于淡水冰,这也使咸水冰融化入渗对土壤盐分的淋洗效果好于淡水冰;咸水冰融水入渗盐碱土的过程受到咸水冰水质、水量、盐碱土类型以及土壤含水量等因素的影响,这也影响了融水入渗盐碱土后

土壤的淋盐效果。基于以上研究我们构建了冬季咸水结冰灌溉改良盐碱地的技术体系,确定了咸水结冰灌溉的灌溉时间、灌水量和水质以及其他配套技术措施,并在此基础上,构建了以咸水结冰灌溉技术为基础的盐碱地适生种植模式,为盐碱区农业生产、生态建设提供了技术支撑。

但是,冬季咸水结冰灌溉是一个复杂和连续的过程,它涉及了咸水冰的融化、融水的入渗、水分和盐分在土壤中的运移,在此过程中又受到诸多因素的影响,如土壤冻结和融化、地下水埋深和水质、土壤物理和化学性质等,针对上述问题的研究仍需进一步完善。

1)咸水结冰灌溉下土壤水盐运移规律的模拟模型。利用模型手段研究揭示不同矿化度咸水连续入渗盐碱土的规律和区域长期咸水结冰灌溉下土壤水盐平衡,为咸水结冰灌溉技术提供理论依据。

2)咸水结冰融水在冻融土壤中的入渗规律。咸水结冰融化是不同矿化度水连续融出的过程,咸水结冰灌溉过程中,土壤也处于冻融状态。迫切需要研究冻融土壤对咸水结冰融水入渗的影响,揭示不同矿化度咸水入渗冻融土壤的规律,进一步认识咸水结冰灌溉融水对土壤盐分的淋洗过程。

3)浅层地下水对咸水结冰灌溉改良效果的影响。盐碱区地下水浅且咸,地下水位对咸水结冰灌溉改良盐碱地效果的研究有待加强。

参考文献 References

- [1] 王志春,梁正伟.植物耐盐研究概况与展望[J].生态环境,2003,12(1):106-109
Wang Z C, Liang Z W. Advances of salt tolerance in plants[J]. Ecology and Environment, 2003, 12(1): 106-109
- [2] 刘阳春,何文寿,何进智,等.盐碱地改良利用研究进展[J].农业科学研究,2007,28(2):68-71
Liu Y C, He W S, He J Z. Progress of improvement and utilization of saline-alkali land[J]. Journal of Agricultural Sciences, 2007, 28(2): 68-71
- [3] 杨劲松.中国盐碱土研究的发展历程与展望[J].土壤学报,2008,45(5):837-845
Yang J S. Development and prospect of the research on salt affected soils in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 837-845
- [4] 张建锋,张旭东,周金星,等.世界盐碱地资源及其改良利用的基本措施[J].水土保持研究,2005,12(6):28-30
Zhang J F, Zhang X D, Zhou J X, et al. World resources of saline soil and main amelioration measures[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2005, 12(6): 28-30
- [5] 俞仁培,陈德明.我国盐渍土资源及其开发利用[J].土壤通报,1999,30(4):158-159
Yu R P, Chen D M. The utilization and exploitation of saline

- soil resources in China[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1999, 30(4): 158-159
- [6] 刘小京, 李向军, 陈丽娜, 等. 盐碱区适应性农作制度与技术探讨——以河北省滨海平原盐碱区为例[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(4): 911-913
- Liu X J, Li X J, Chen L N, et al. Study on the adaptive farming system in saline soils — A case study in saline area of strand plain in Hebei Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(4): 911-913
- [7] 牛东玲, 王启基. 盐碱地治理研究进展[J]. 土壤通报, 2002, 33(6): 449-455
- Niu D L, Wang Q J. Research progress on saline-alkali field control[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2002, 33(6): 449-455
- [8] 刘玉春, 安秀容, 杨路华. 河北省微咸水利用潜力分析[J]. 水科学与工程, 2006(1): 13-15
- Liu Y C, An X R, Yang L H. Potential analysis of brackish water utilization in Hebei[J]. Water Science and Engineering Technique, 2006(1): 13-15
- [9] 王卫光, 张仁铎, 王修贵. 咸水灌溉下土壤水盐变化的试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2004, 23(3): 1-4
- Wang W G, Zhang R D, Wang X G. Water and salt transport on saline water irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2004, 23(3): 1-4
- [10] 逢焕成, 杨劲松, 严惠峻. 微咸水灌溉对土壤盐分和作物产量影响研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(6): 599-603
- Pang H C, Yang J S, Yan H J. Effect of irrigation with saline water on soil salinity and crop yield[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2004, 10(6): 599-603
- [11] 李志刚, 刘小京, 张秀梅, 等. 冬季咸水结冰灌溉后土壤水盐运移规律的初步研究[J]. 华北农学报, 2008, 23(增刊): 187-192
- Li Z G, Liu X J, Zhang X M, et al. A primary study on the reclamation of coastal saline soil with freezing irrigation of saline water in winter[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2008, 23(S): 187-192
- [12] 郭凯, 张秀梅, 李向军, 等. 冬季咸水结冰灌溉对滨海盐碱地的改良效果研究[J]. 资源科学, 2010, 32(3): 431-435
- Guo K, Zhang X M, Li X J, et al. Effect of freezing saline water irrigation in winter on the reclamation of coastal saline soil[J]. Resources Science, 2010, 32(3): 431-435
- [13] Li Z G, Liu X J, Zhang X M, et al. Infiltration of melting saline ice water in soil columns: Consequences on soil moisture and salt content[J]. Agricultural Water Management, 2008, 95(4): 498-502
- [14] Zhang D F, Wang S J. Mechanism of freeze-thaw action in the process of soil salinization in northeast China[J]. Environmental Geology, 2001, 41(1/2): 96-100
- [15] 张殿发, 郑琦宏, 董志颖. 冻融条件下土壤中水盐运移机理探讨[J]. 水土保持通报, 2005, 25(6): 14-18
- Zhang D F, Zheng Q H, Dong Z Y, et al. Mechanism of soil salt-moisture transfer under freeze-thawing condition[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2005, 25(6): 14-18
- [16] 张殿发, 郑琦宏. 冻融条件下土壤中水盐运移规律模拟研究[J]. 地理科学进展, 2005, 24(4): 46-55
- Zhang D F, Zheng Q H. Simulation of water-salt movement law under the freeze-thawing condition[J]. Progress in Geography, 2005, 24(4): 46-55
- [17] Qadir M, Oster J D. Crop and irrigation management strategies for saline-sodic soils and waters aimed at environmentally sustainable agriculture[J]. Science of the Total Environment, 2004, 323(1/3): 1-19
- [18] Oster J D. Irrigation with poor quality water[J]. Agricultural Water Management, 1994, 25(3): 271-297
- [19] 王全九, 徐益敏, 王金栋, 等. 咸水与微咸水在农业灌溉中的应用[J]. 灌溉排水, 2002, 21(4): 73-78
- Wang Q J, Xu Y M, Wang J D, et al. Application of saline and slight saline water for farmland irrigation[J]. Irrigation and Drainage, 2002, 21(4): 73-78
- [20] Bauder J W, Brock T A. Irrigation water quality, soil amendment, and crop effects on sodium leaching[J]. Arid Land Research and Management, 2001, 15(2): 101-113
- [21] 马东豪, 王全九, 苏莹, 等. 微咸水入渗土壤水盐运移特征分析[J]. 灌溉排水学报, 2006, 25(1): 62-66
- Ma D H, Wang Q J, Su Y, et al. Analysis of the characteristics of soil water and salt movement in saline water infiltration[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2006, 25(1): 62-66
- [22] 肖振华, 万洪富. 灌溉水质对土壤水力性质和物理性质的影响[J]. 土壤学报, 1998, 35(3): 359-366
- Xiao Z H, Wan H F. Effect of irrigation water quality on soil hydraulic and physical properties[J]. Acta Pedologica Sinica, 1998, 35(3): 359-366
- [23] 苏莹, 王全九, 叶海燕, 等. 微咸水不同入渗水量土壤水盐运移特征研究[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(4): 43-48
- Su Y, Wang Q J, Ye H Y, et al. Study on water and salt transporting feature of soil with different infiltration amount of saline water[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2005, 23(4): 43-48
- [24] Tedeschi A, Dell'Aquila R. Effects of irrigation with saline waters, at different concentrations, on soil physical and chemical characteristics[J]. Agricultural Water Management, 2005, 77(1/3): 308-322
- [25] Suarez D L, Wood J D, Lesch S M. Effect of SAR on water infiltration under a sequential rain-irrigation management system[J]. Agricultural Water Management, 2006, 86(1/2): 150-164
- [26] 李佳, 曹彩云, 郑春莲, 等. 河北低平原小麦长期咸水灌溉的矿化度阈值研究[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(5): 643-651
- Li J, Cao C Y, Zheng C L, et al. Salinity threshold of long-term saline water irrigation for winter wheat in Hebei Lowland Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(5): 643-651
- [27] 史培军, 哈斯, 袁艺, 等. 渤海海冰作为淡水资源: 脱盐机理与可利用价值[J]. 自然资源学报, 2002, 17(3): 353-360
- Shi P J, Ha S, Yuan Y, et al. The desalinization of Bohai sea ice and its value as fresh water resources[J]. Journal of Natural Resources, 2002, 17(3): 353-360
- [28] Khawaji A D, Kutubkhanah I K, Wieg J M. Advances in sea-

- water desalination technologies[J]. *Desalination*, 2008, 221(1/3): 47–69
- [29] Williams P M, Ahmad M, Connolly B S. Freeze desalination: An assessment of an ice maker machine for desalting brines[J]. *Desalination*, 2013, 308: 219–224
- [30] Nakagawa K, Maebashi S, Maeda K. Freeze-thawing as a path to concentrate aqueous solution[J]. *Separation and Purification Technology*, 2010, 73(3): 403–408
- [31] Wang X B, Zhao Q S, Hu Y J, et al. An alternative water source and combined agronomic practices for cotton irrigation in coastal saline soils[J]. *Irrigation Science*, 2011, 30(3): 221–232
- [32] 罗从双, 谌文武, 韩文峰. 冷冻法净化苦咸水的试验[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2010, 46(2): 6–10
- Luo C S, Chen W W, Han W F. Desalination of brackish water through freezing[J]. *Journal of Lanzhou University: Natural Sciences*, 2010, 46(2): 6–10
- [33] Beier N, Sego D, Donahue R, et al. Laboratory investigation on freeze separation of saline mine waste water[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2007, 48(3): 239–247
- [34] 郭凯, 刘小京. 咸水结冰融化过程中水质与水量的变化规律初步研究[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(1): 56–60
- Guo K, Liu X J. The primary research on the variation of melted water quality and quantity during saline ice melting[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2013, 32(1): 56–60
- [35] Guo K, Liu X J. Infiltration of meltwater from frozen saline water located on the soil can result in reclamation of a coastal saline soil[J]. *Irrigation Science*, 2015, 33(6): 441–452
- [36] 封晓辉, 张秀梅, 郭凯, 等. 覆盖措施对咸水结冰灌溉后土壤水盐动态和棉花生产的影响[J]. 棉花学报, 2015, 27(2): 135–142
- Feng X H, Zhang X M, Guo K, et al. Effects of different salt control measures after saline water freezing irrigation to soil water, salt dynamics, cotton emergence and yield[J]. *Cotton Science*, 2015, 27(2): 135–142
- [37] 郭凯, 陈丽娜, 张秀梅, 等. 不同钠吸附比的咸水结冰融水入渗后滨海盐土的水盐分布[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(3): 506–510
- Guo K, Chen L N, Zhang X M, et al. Water and salt distribution in coastal saline soil after infiltration of meltwater of saline water ice with different sodium adsorption ratio[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(3): 506–510
- [38] 潘洁, 肖辉, 王立艳, 等. 咸水冰融化与土壤入渗过程不同盐离子迁移规律研究[J]. 华北农学报, 2012, 27(1): 210–214
- Pan J, Xiao H, Wang L Y, et al. Study on migration of different salt ions in melting and infiltration processes of saline water ice[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2012, 27(1): 210–214
- [39] 车升国, 林志安, 赵秉强, 等. 咸水结冰灌溉对盐化潮土盐基离子剖面迁移规律的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(4): 88–93
- Che S G, Lin Z A, Zhao B Q, et al. Effects of agricultural irrigation by melting saline water ice on soil salt and ion movement under fluvo-aquic soils[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(4): 88–93
- [40] Guo K, Liu X J. Dynamics of meltwater quality and quantity during saline ice melting and its effects on the infiltration and desalinization of coastal saline soils[J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 139: 1–6
- [41] 郭凯, 张秀梅, 李向军, 等. 不同钠吸附比的咸水结冰融水入渗对苏打碱土的水盐运移影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(4): 94–98
- Guo K, Zhang X M, Li X J. Effect of the water and salt transport on soda alkaline soil after infiltration with melting ice saline water of different SAR[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(4): 94–98
- [42] 杨帆, 王志春, 肖辉. 冬季结冰灌溉对苏打盐碱土水盐变化的影响[J]. 地理科学, 2012, 32(10): 1241–1246
- Yang F, Wang Z C, Xiao Y. Effect of freezing water irrigation on the changes of soilwater and salt in saline-sodic soil area[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, 32(10): 1241–1246